

УДК 504:535.36

ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИДА УГЛЕРОДА В ВЫБРОСАХ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

канд. техн. наук, доц. *О.С. ЗАЛЫГИНА*, д-р физ.-мат. наук *В.П. КАБАШНИКОВ*
(Белорусский государственный технологический университет, Минск),
Н.С. МЕТЕЛЬСКАЯ
(Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрена четырехканальная схема недисперсионного корреляционного радиометра для определения поглощающей массы CO в нагретых газообразных промышленных выбросах с использованием излучения исследуемого газа. Показано, что для повышения точности измерений градуировку следует проводить при температуре, равной предполагаемой температуре исследуемого газа; колебания температуры атмосферы на значение выходного сигнала существенно не влияют.

Получены зависимости выходного сигнала от поглощающей массы измеряемого газа в исследуемом выбросе при различных атмосферных условиях и наличии мешающих примесей. Показано влияние колебаний температуры исследуемого газа на точность измерений.

Введение. В настоящее время загрязнение атмосферы – одна из важнейших экологических проблем. Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха на территории Республики Беларусь являются автотранспорт, объекты энергетики и промышленные предприятия. В 2004 году ими выброшено в атмосферу 1329,4 тыс. т загрязняющих веществ. В составе выбросов в атмосферу преобладали оксид углерода – 56,4 %, углеводороды – 19,6 %, оксиды азота – 11,1 % и диоксид серы – 6,9 % [1]. Объемы выбросов оксида углерода в 2004 году по сравнению с 2003 годом увеличились на 16,9 тыс. т.

Более половины оксида углерода (75...85 %), поступающего в атмосферу в результате деятельности человека, приходится на долю автотранспорта. Основными антропогенными стационарными источниками CO являются энергетические и тепловые установки при неполном сгорании углеродсодержащего топлива. Средние за год концентрации оксида углерода в городах Беларуси находились в пределах 0,3 ПДК и менее. Однако во многих городах Беларуси наблюдалось превышение максимальной разовой ПДК для CO , равной 5 мг/м³. Наибольшее превышение наблюдалось в Полоцке (4 ПДК) из-за близости Новополоцка, который лидирует среди всех белорусских городов по объему выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников. В то же время превышение ПДК в самом Новополоцке наблюдалось в два раза меньше, чем в Полоцке. Это объясняется тем, что в Беларуси преобладает западный ветер, и выбросы предприятий с большой высотой труб проходят над Новополоцком и достигают поверхности земли в Полоцке.

В настоящее время большинство измерений при контроле источников выбросов CO проводится при помощи контактных методов. Необходимость отбора пробы воздуха ведет к трудоемкости измерений, недоступности многих точек наблюдения, недостаточной экспрессности анализа. В связи с этим разрабатываются дистанционные методы контроля, среди которых одним из перспективных является метод недисперсионной корреляционной спектроскопии [2].

Метод недисперсионной корреляционной спектроскопии. Классическая блок-схема устройства, реализующего метод недисперсионной корреляционной спектроскопии для измерения содержания оксида углерода, приведена на рисунке 1.

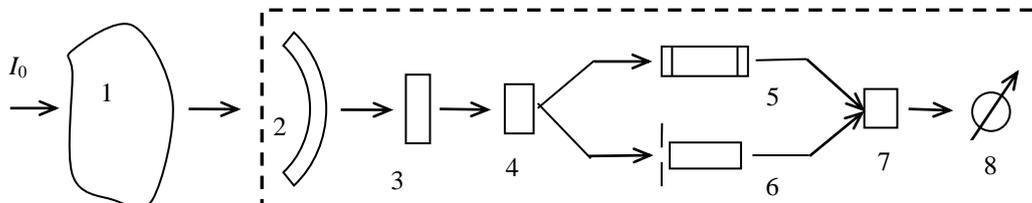


Рис. 1. Блок-схема недисперсионного корреляционного радиометра

Пробное излучение (излучение подсветки) I_0 проходит через исследуемую смесь газов I , входную оптику радиометра 2 и фильтр 3, выделяющий полосу поглощения CO 4,6 мкм. С помощью модулирующего устройства 4 излучение разделяется на два потока и пропускается поочередно через корреляцион-

ную кювету 5 с определенным количеством СО и через нейтральный ослабитель 6. В условиях заведомого отсутствия СО на измерительной трассе пропускание нейтрального ослабителя подбирается так, чтобы интегральный поток излучения H_k , прошедший через корреляционную кювету, сравнялся с интегральным потоком излучения H_n , прошедшим через нейтральный ослабитель. Спектр поглощения СО в полосе 4,6 мкм носит селективный характер, поэтому при наличии СО в выбросе кювета ослабляет излучение в меньшей степени, чем нейтральный ослабитель. Потоки излучения H_k и H_n фокусируются на приемнике излучения 7 и поступают в электронную систему обработки 8, которая формирует на выходе сигналы, пропорциональные разности потоков $H_1 \equiv H_k - H_n$ и их сумме $H_2 \equiv H_k + H_n$ соответственно. На устройство индикации выводится значение $H = H_1/H_2$, по которому судят о содержании СО на измерительной трассе.

Четырехканальная схема недисперсионного корреляционного радиометра. Применение искусственного источника излучения делает процесс измерения громоздким и дорогостоящим. Нами рассмотрена возможность измерения содержания СО в промышленных выбросах в отсутствие излучения подсветки, с использованием излучения нагретого исследуемого газа.

В этом случае классическая двухканальная схема не дает возможности однозначного определения содержания СО по выходному сигналу [3]. Для устранения данного недостатка нами предложена схема, изображенная на рисунке 2. Излучение объема исследуемого газа 1, прошедшее через слой атмосферы, входную оптику 2 и фильтр 3, с помощью модулирующего устройства 4 пропускается поочередно через корреляционные кюветы 5 и 7 с определенным содержанием СО и через нейтральные ослабители 6 и 8. Для обеспечения возможности измерения поглощающих масс определяемого газа в максимально большом диапазоне следует выбрать поглощающую массу в кювете 5 настолько большой, насколько допустимо для различения колебательно-вращательной структуры полосы поглощения, и поглощающую массу в кювете 7 настолько малой, насколько допустимо для уверенной регистрации поглощения в этой кювете. Потоки излучения, прошедшие по всем четырем каналам радиометра, фокусируются на приемнике излучения 9 и поступают в электронную систему обработки 10, которая формирует на выходе сигнал $H^* = (H_n^{(1)} - H_k^{(1)}) / (H_n^{(2)} - H_k^{(2)})$, где $H_k^{(1)}$ и $H_k^{(2)}$ – потоки излучения, прошедшие через корреляционные кюветы 5 и 7, $H_n^{(1)}$ и $H_n^{(2)}$ – через нейтральные ослабители 6 и 8 соответственно. По величине сигнала H^* судят о поглощающей массе измеряемого газа.

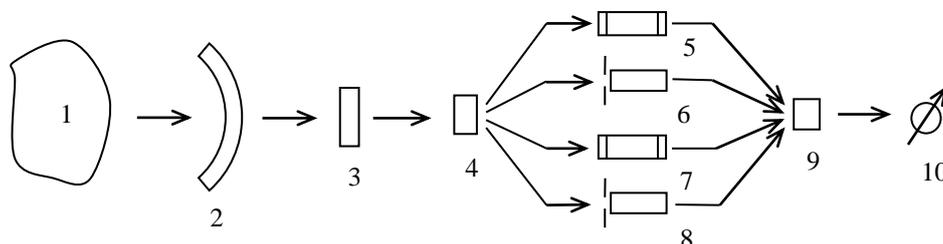


Рис. 2. Блок-схема четырехканального радиометра

Формирование выходного сигнала в виде отношения разностей интегральных потоков излучения позволяет избавиться от влияния колебаний теплового излучения атмосферы и в значительной степени от теплового излучения исследуемой смеси газов. Установка нуля может быть проведена путем приравнивания интегральных потоков, прошедших через корреляционную кювету 5 и нейтральный ослабитель 6, и приравнивания интегральных потоков, прошедших через корреляционную кювету 7 и нейтральный ослабитель 8, в условиях заведомого отсутствия исследуемого газа с использованием источника излучения с известными параметрами.

Рабочий диапазон и чувствительность. Для получения характеристик предложенной схемы проведены расчеты зависимости выходного сигнала от поглощающей массы СО на измерительной трассе для полосы СО 4,6 мкм при различных состояниях атмосферы и исследуемого газа. При расчете использовались параметры тонкой структуры спектра поглощения СО [4]. Форма пропускания фильтра моделировалась лоренцовским контуром с частотой центра 2173 см^{-1} и полушириной 20 см^{-1} .

Расчеты показали монотонность градуировочной кривой (т.е. зависимости сигнала H^* на выходе радиометра от поглощающей массы СО на измерительной трассе m) и достаточную чувствительность метода в диапазоне поглощающих масс СО $0,1 \dots 100 \text{ атм}\cdot\text{см}$ (рис. 3, кривая 1). Однако при значениях поглощающей массы СО менее $0,1 \text{ атм}\cdot\text{см}$ требуется измерение очень малых потоков излучения с высокой точностью; при значениях поглощающей массы СО более $10 \text{ атм}\cdot\text{см}$ требуется определение с высокой точностью разности между близкими по величине потоками излучения. Поэтому для обеспечения устойчиво-

сти выходного сигнала необходимо выделить рабочий участок градуировочной кривой $0,1 < m < 10$ атм·см, что может быть осуществлено с помощью сигнала $H^{**} = (H_n^{(1)} - H_k^{(1)}) / (H_n^{(1)} + H_k^{(1)})$ (рис. 3, кривая 2).

При значениях вырезающего сигнала, меньших половины его максимальной величины, электронная система обработки выдает сообщение о выходе значения поглощающей массы СО на трассе за пределы рабочего диапазона.

Использование дополнительного вырезающего сигнала H^{**} позволяет ограничить рабочий диапазон радиометра значениями от 0.1 до 10 атм·см, что приблизительно соответствует объемному содержанию СО в выбросе от 0.1% до 10% при диаметре трубы 1 м.

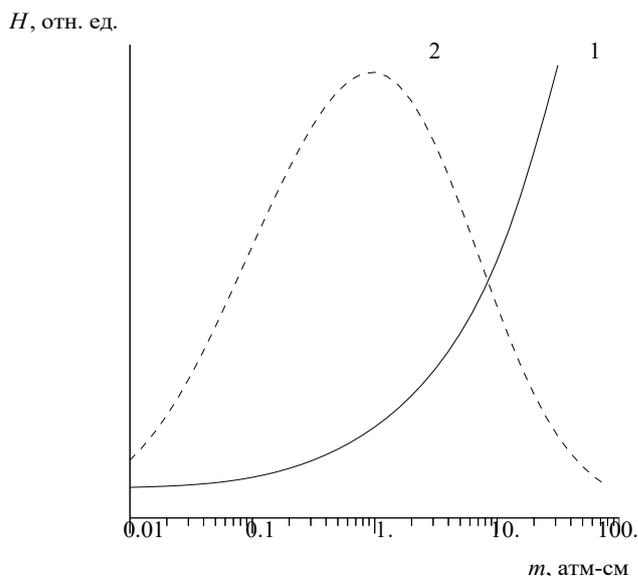


Рис. 3. Градуировочная кривая четырехканального корреляционного радиометра 1 и вырезающий сигнал 2 (приведены в разных масштабах) при температуре исследуемого газа 373 К, температуре окружающей среды 273 К, поглощающей массе СО в корреляционных кюветах 5 атм·см и 0.03 атм·см

Помехи, влияющие на точность измерений. На точность измерений оказывает влияние изменение температуры исследуемого газа. Колебания температуры ΔT для достаточно мощных источников нагретых выбросов могут достигать 50...200 °С [5]. На рисунке 4 показаны зависимости выходного сигнала от поглощающей массы измеряемого газа при различных значениях температуры выброса.

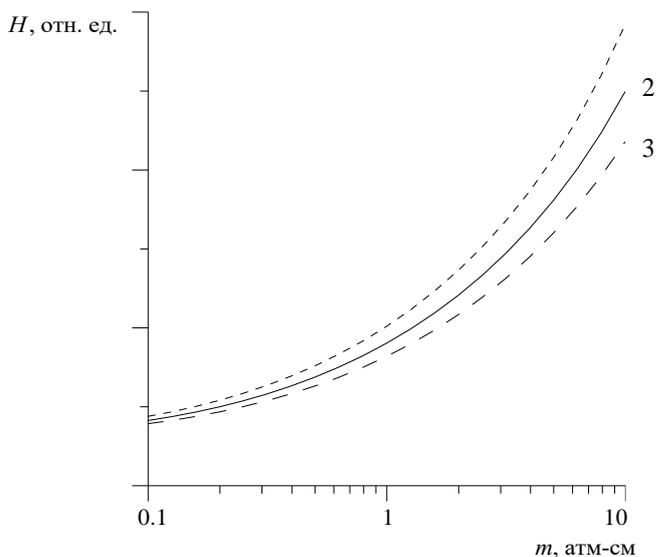


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала от поглощающей массы СО

при температуре исследуемого газа 350 К (кривая 1), 400 К (кривая 2), 450 К (кривая 3)

Таким образом, для повышения точности измерений градуировку следует проводить при температуре, равной предполагаемой температуре исследуемого газа. Колебания температуры атмосферы на значение выходного сигнала существенно не влияют.

В промышленном выбросе могут присутствовать H_2O и CO_2 , полосы поглощения которых перекрываются с полосой поглощения CO . При дистанционных измерениях необходимо учитывать также наличие газов, линии поглощения которых попадают в полосу пропускания фильтра, в атмосфере между облаком исследуемого газа и измерительным устройством. При измерении CO такими газами являются H_2O (концентрация 0...5 %) и CO_2 (фоновая концентрация 0,3 %), а также содержащийся в атмосфере CO (фоновая концентрация 10^{-5} %) [6].

Расчеты показали, что наличие H_2O и CO_2 в атмосфере не оказывают существенного влияния на точность измерений содержания CO в исследуемом выбросе. В то же время наличие CO на измерительной трассе между выбросом и радиометром приводит к появлению точки разрыва на кривой зависимости выходного сигнала от поглощающей массы измеряемого газа. Возникновение точки разрыва связано с тем, что при наличии атмосферного CO излучение на входе радиометра ослаблено в центрах линий, где способна поглощать кювета. При определенном соотношении значений поглощающей массы CO в облаке и на трассе между облаком и радиометром поток излучения, прошедший через кювету с меньшим содержанием CO , становится равным потоку излучения, прошедшего через соответствующий нейтральный ослабитель. При этом значение сигнала H^* становится не определенным, а измерения невозможными.

Положение точки разрыва на градуировочной кривой зависит от поглощающей массы CO в корреляционной кювете $m_k^{(2)}$ и поглощающей массы CO на измерительной трассе между исследуемым выбросом и радиометром m_a^{co} . При $m_k^{(2)} = 0,03$ атм·см и $m_a^{co} = 0,01$ атм·см (соответствует фоновому содержанию CO в атмосфере и расстоянию между облаком и радиометром 1000 м) точка разрыва лежит вблизи значения поглощающей массы CO в облаке 15 атм·см. При $m_k^{(2)} = 0,03$ и $m_a^{co} = 0,001$ атм·см (соответствует расстоянию между облаком и радиометром 100 м) точка разрыва лежит вблизи 100 атм·см, т.е. вне рабочего диапазона. При этом значительного снижения точности вдали от точки разрыва (в рабочем диапазоне) не возникает. Зависимость выходного сигнала от поглощающей массы CO в облаке исследуемого газа при фоновом содержании CO , H_2O и CO_2 в атмосфере и расстоянии между облаком и радиометром 100 м показана на рисунке 5.

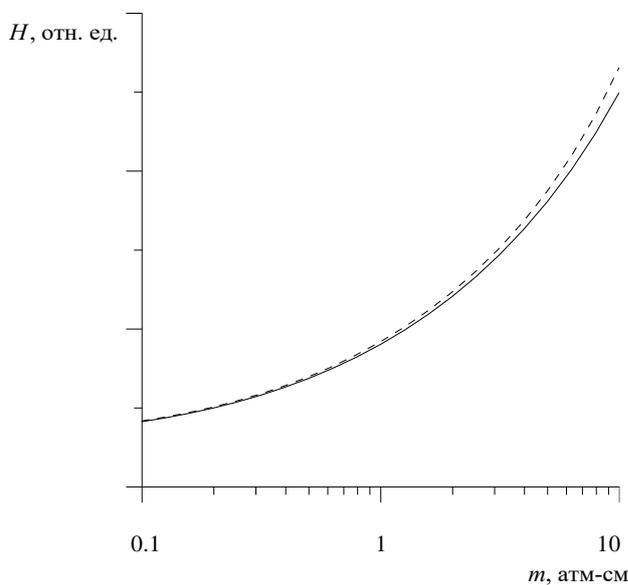


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала от поглощающей массы CO в исследуемом выбросе при градуировке (сплошная линия) и при измерениях на расстоянии 100 м в присутствии атмосферных CO (10^{-5} %), H_2O (0,6 %) и CO_2 (0,03 %) (штриховая линия)

Положение точки разрыва сдвигается в сторону больших поглощающих масс измеряемого газа (тем самым увеличивается дальность измерений) при увеличении поглощающей массы в кювете с меньшим наполнением. Однако увеличение поглощающей массы в кювете с меньшим наполнением приводит

к уменьшению крутизны градуировочной кривой, т.е. уменьшению чувствительности и сужению рабочего диапазона. Поэтому вопрос о количестве газа в корреляционной кювете должен решаться в результате компромисса между чувствительностью и дальностью измерений. Можно рекомендовать наполнение корреляционных кювет 5 атм·см и 0,03 атм·см, если расстояние между радиометром и облаком исследуемого газа не превышает 100 м.

Присутствие примесей в облаке исследуемого газа также может влиять на точность измерений. В промышленных выбросах, содержащих CO, могут присутствовать H₂O и CO₂. На рисунке 6 приведены градуировочная кривая и выходной сигнал при наличии в облаке исследуемого газа примесей H₂O и CO₂.

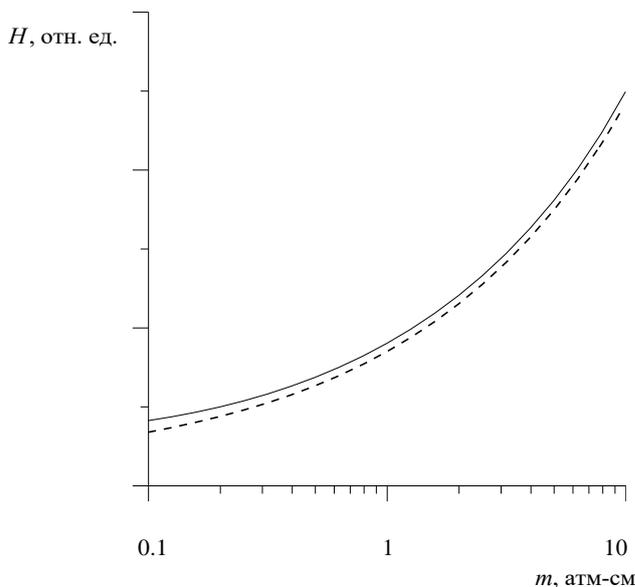


Рис. 6. Зависимость выходного сигнала от поглощающей массы CO в облаке исследуемого газа в отсутствие мешающих примесей (сплошная линия) и при наличии H₂O в количестве 10 атм·см и CO₂ в количестве 10 атм·см (штриховая линия)

Как видно из рисунков 5...6, наличие примесей H₂O и CO₂ в облаке исследуемого газа и в атмосфере может приводить в худшем случае к погрешности до 50 % (при содержании в облаке исследуемого газа 0,1 атм·см CO, 10 атм·см H₂O и 10 атм·см CO₂), однако с увеличением содержания CO в облаке погрешность быстро уменьшается и не превышает 10 % в диапазоне измеряемых поглощающих масс 1...10 атм·см.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточной чувствительности и помехоустойчивости разработанной четырехканальной схемы для дистанционного измерения содержания CO в промышленных выбросах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние природной среды Беларуси: экол. бюл. / под ред. В.Ф. Логинова. – Минск: Минсктиппроект, 2005. – 285 с.
2. Назаров, И.М. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды / И.М. Назаров, А.Н. Николаев, Ш.Д. Фридман. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 280 с.
3. Кабашников, В.П. Метод пассивной корреляционной спектроскопии газов, основанный на их тепловом излучении / В.П. Кабашников, Н.С. Метельская // Журнал прикладной спектроскопии. – 2001. – Т. 68, № 6. – С. 790 – 793.
4. The HITRAN molecular spectroscopic database and HAWKS: edition / L.S. Rothman [et al.] // J. Quant. Spectr. and Radiat. Transfer. – 1998. – V. 60. – P. 665 – 710.
5. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
6. Зуев, В.Е. Современные проблемы атмосферной оптики / В.Е. Зуев, В.В. Зуев. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – Т. 8: Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. – 232 с.

Поступила 01.12.2006